

신뢰성 해석에 의한 제방의 월류 위험도 산정

Evaluation of Overtopping Risks of Levee by using Reliability Analysis

이 철 응* 박 등 현** 심 재 욱***
Lee, Cheol-Eung Park, Dong-Heon Shim, Jae-Wook

Abstract

Due to frequent occurrence of a localized torrential downpour caused by global warming and change of outflow tendency caused by rapid urbanization and industrialization, risk analysis must be carried out in levee design with uncertainty. In this study, reliability analysis was introduced to quantitatively evaluate the overtopping risk of levee by the uncertainty. First of all, breaking function was established as a function of flood stage and height of levee. All variables of breaking function were considered as random variables following any distribution functions, and the risk was defined as the possibility that the flood stage is formed higher than height of levee. The risk evaluation model was developed with AFDA (Approximate Full Distribution Approach). The flood stage computed by 2-D numerical model FESWMS-2DH was used as input data for the model of levee risk evaluation. Risk for levee submergence were quantitatively presented for levee of Wol-Song-Cheon.

키워드 : 제방, 신뢰성 해석, 위험도, FESWMS-2DH 모형
Keywords : levee, reliability analysis, risk, FESWMS-2DH model

1. 서론

제방 및 하천 구조물을 설계하는데 현재까지는 결정론적 설계법이 적용 되어 왔다. 결정론적 해석 방법에서는 이들 설계변수의 값과 실제의 값과 차이, 즉, 어떤 확률변수의 불확실성에 $\sqrt{5}$ 의하여 발생할 수 있는 위험성이 하중에 대한 저항의 비로 정의 되는 안전계수(safety factor)에 의하여 종합적으로 고려되고 있다. 비로 이와 같은 결정론적 설계법이 매우 오랜 기간 동안 적용되어 왔지만 설계된 구조물의 파괴에 대한 안정성을 정량적으로 명확하

게 규명할 수 없다는 커다란 결점을 가지고 있다. 즉, 안전계수를 일정량 증가시킬 경우 구조물의 안정성이 얼마나 증가할 것인가 등에 대한 정량화가 어렵다. 또한 구조물의 종류에 따라 안전계수의 여유를 얼마로 부여할 것에 대한 근거도 명확하지 않다. 따라서 설계자가 관련 변수의 변화에 따른 구조물의 안정성을 정량적으로 평가하여 이를 합리적으로 조정·결정하는 과정을 통해 구조물을 최적 설계하는 것이 곤란하다[1]. 또한 결정론적 해석법은 기본적으로 구조물의 변형을 허용하지 않는다는 개념에 근거한다. 즉, 매우 적지만 구조물에 변형이 발생된다면 이를 파괴라고 생각한다. 그러나 변형이 발생되더라도 그 변형의 크기가 아주 작아 구조물이 원래의 제 기능을 수행하는데 전혀 지장이 없다면 기능수행 능력이 손상된 것은 아니다. 따라서 적절한 허용범위 내에서 다소간의 변형

* 강원대학교 토목공학과 교수, 교신저자
** 강원대학교 토목공학과 박사과정
*** 강원대학교 토목공학과 공학석사

을 허용하는 것이 가능하다면 보다 경제적인 설계가 가능하다고 할 수 있다.

확률론적 해석법은 결정론적 해석법과는 다르게 해석 단계에서부터 각 변수들의 불확실성을 고려할 수 있는 확률론적 개념에 기초한 해석법이다 [2]. 확률론적 해석법을 도입하는 궁극적인 목적은 구조물이 갖게 되는 안정성을 정량적으로 평가하고 이를 합리적으로 조정하여 최적의 구조물 설계를 수행하는데 있다. 이를 위해 확률론적 해석법에서는 하중 및 저항력에 영향을 주는 모든 변수들을 결정론적 해석법과는 다르게 확정치가 아닌 임의의 불확실성을 갖는 확률변수로 고려하고 있다 [3].

이미 언급된 바와 같이 확률론적 해석법에서는 제방 등과 같은 하천 구조물의 설계에 포함된 모든 변수들을 확정치가 아닌 임의의 불확실성을 갖는 확률변수로 고려하여 설계되기 때문에 극단적으로 과대한 또는 과소한 설계가 될 위험성을 감소시키는 것이 가능하다. 사회적·경제적 요인들에 맞는 수준에서 최적 설계가 가능하다. 또한 구조물의 위험성을 시간의 함수로 추정, 정량화할 수 있기 때문에 장기적인 유지 및 보수에도 유용하게 이용될 수 있다[4].

2. 파괴함수의 수립

파괴함수란 대상 구조물에 어떤 조건이 주어졌을 때 이 조건에서 설계자가 의도한 제반 기능들이 수행될 수 있는지 여부를 판단하기 위하여 임의로 정의된 함수이다. 따라서 확률론적 해석을 올바르게 수행하기 위해서는 무엇보다 먼저 파괴모드와 관련된 파괴함수를 올바르게 수립하는 것이 필요하다. 파괴함수는 수학적으로는 파괴영역과 안전영역의 경계를 나타내는 함수이기 때문에 현재까지 수행된 관련 문제에 대한 연구 결과를 근간으로 수립된다[5].

어떤 경험적 또는 수학적 모형을 이용하는 파괴함수는 일반적으로 저항함수와 하중함수의 차로 정의할 수 있다. 이때 저항함수는 외력에 저항할 수 있는 확률변수들로 구성되며, 하중함수는 반대로 구조물의 기능 수행능력을 약화시키는 외력과 관련된 확률변수들로 구성된다. 그러나 임의의 경험식을 이용하다 보면 어떤 확률변수가 저항함수에 포함되는지 아니면 하중함수에 포함되는지 명확하지 않을 때가 있다. 이때는 다음과 같이 해당 확률변수를 변화시키면서 신뢰함수가 증가되는지 또는 감소하는지를 살펴보면 쉽게 알 수 있다.

$$\partial Z / \partial X_i > 0, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

즉, 파괴함수에 포함된 임의의 확률변수가 식

(1)을 만족하면 해당 확률변수는 저항함수를 구성하는 확률변수가 될 것이고, 그렇지 않은 경우에는 하중함수를 구성하는 확률변수로 해석될 수 있다. 이와 같은 과정은 현재의 결정론적 해석법과 표현 방법이 다를 뿐 그 근본적인 개념은 동일하다고 판단된다. 이미 언급된 바와 같이 확률론적 해석과 결정론적 해석이 다른 근본적인 차이는 해석 과정에 관련변수를 확률변수로 고려하느냐, 그렇지 않느냐에 있다. 따라서 수립된 파괴함수를 파괴 이론으로 해석하기 위해서는 관련된 확률변수에 대한 물리적 거동특성들이 관련 변수의 통계적 특성인 평균 및 분산 그리고 해당 확률분포함수에 의하여 올바르게 고려되어야 한다.

확률론적 해석에서 생각해야 할 불확실성은 크게 다음과 같이 세 가지로 구분할 수 있다[6]. 먼저 확률변수가 고유하게 갖게 되는 물리적 불확실성(random uncertainty)이다. 이와 같은 물리적 불확실성을 해석하기 위하여 도입된 확률적 개념이 확률분포함수이다. 또한 도입된 확률분포함수는 또 평균이나 분산 등과 같은 여러 변수들에 의존하게 된다. 따라서 확률분포함수의 거동특성을 정의하기 위해서는 먼저 분포함수의 변수들이 결정되어야 하는데, 이와 같은 변수들의 결정과정에 내포되는 불확실성을 통계적 불확실성(statistical uncertainty)이라 한다. 따라서 이와 같은 불확실성을 정확하게 산정하기 위해서는 임의의 현상과 관련된 자료의 축적이 필요하다. 마지막으로 중요하게 생각해야 할 불확실성이 파괴함수를 수립하는 과정에 사용된 수학적 모형 자체가 내포하는 불확실성(model uncertainty)이다. 일반적으로 수학적 모형은 현상과 관련된 변수들의 변화에 따른 결과를 예측하기 위하여 개발되고 제시된다. 현재 하천 구조물의 안정성 해석을 위하여 제시된 대부분의 모형들은 적용의 간편성을 도모하기 위하여 경험적으로 제시된 것이다. 따라서 제시된 경험식속에는 많은 불확실성들이 필연적으로 내포될 수밖에 없다. 또한 아무리 현상과 관련된 입력 자료를 정확하게 알고 있어도 그로 인해 발생될 결과를 정확하게 예측하는 것은 불가능하다.

이상에서 언급된 바와 같이 확률론적 해석을 올바르게 수행하기 위해서는 다음과 같이 세 단계를 거쳐야 한다. 먼저 구조물에 영향을 줄 수 있는 확률변수들의 결정이다. 이와 같은 확률변수에는 크게 기하학적인 변수가 있을 것이고, 재료의 특성을 나타내는 변수가 있을 것이며, 또한 외력과 관련된 변수가 있을 것이다. 다음 단계는 파괴함수의 수립이다. 앞에서 언급된 바와 같이 중량 산정을 위한 임의의 경험식을 사용하는 경우에는 이상의 두 단계가 동시에 이루어질 수 있다. 다만 주위 할 점은 파괴함수를 수립하는 과정에 가능하면 파괴모드와 관련된 많은 변수들을 확률변수로 고려하는 것이

바람직하고, 또한 경험식 자체가 내포하는 불확실성을 고려할 수 있는 확률변수도 포함되어야 한다. 마지막 단계로는 저항함수와 하중함수, 즉 파괴함수를 구성하는 각 확률변수들에 대한 확률적 분포 특성과 통계적 변수들이 해석과정에 올바르게 고려되어야 한다.

제방의 월류 위험도 모형을 수립하기 위해서는 먼저 월류에 대한 파괴모드를 정확하게 정의하여야 한다. 본 연구에서는 그림 1에 나타난 일반적인 제방을 사용하였다.

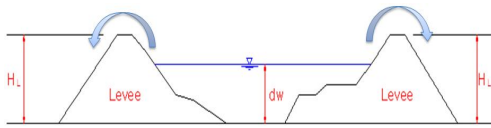


그림 1 제방 월류 일반적인 형태

홍수위가 제방고 보다 크게 될 때 월류된다고 생각하면 파괴함수와 불확실성의 개념으로 저항력과 하중을 분리하면 다음 식 (2)와 같은 파괴함수를 쉽게 얻을 수 있다.

$$Z = H_L - (d_w + Fd_w) \quad (2)$$

여기서, Z 는 안전여유(safety margin), H_L 은 제방고, d_w 는 홍수위, Fd_w 는 바람에 의한 변동수위이다. 따라서 확률론적 해석을 올바르게 수행하기 위해서는 파괴함수에 포함된 모든 변수들을 확률변수로 고려해야 한다. 또한 각 확률변수의 거동특성에 맞는 분포함수를 이용해야만 한다. 특히 홍수위에 대한 분포함수는 정규분포를 따르지 않고 극치분포(extreme distribution)를 따른다고 가정하였다. 이는 관측 자료에 근거한 것이다. 그 외 다른 확률변수들은 정규분포를 따른다고 가정하였다.

3. 월류 위험도 해석법

본 연구에서 제방의 월류 위험도를 산정하기 위하여 적용한 확률론적 해석법은 AFDA(Approximate Full Distribution Approach) 해석법이다. AFDA해석법은 확률변수들이 독립적이면서 정규분포를 따른다는 제약성을 해결할 수 있다. 기본적인 개념은 임의의 상관성을 갖는 확률변수들이 있으면 이들을 서로 독립적인 관계로 변환시키는 과정이, 비정규분포를 따르는 확률변수가 있는 경우는 해당 확률밀도함수와 분포함수를 유사정규분포(equivalent normal distribution)로 변환하는 과정이 필요하게 된다. 아래에 유사정규분포 변환 과정만 언급하였다.

비정규분포를 따르는 확률변수가 있을 때는 Ro

senblatt 변환을 이용하여 해당 확률변수의 분포를 정규분포화할 수 있다. 이와 같이 정규분포화된 확률분포를 유사정규분포라 한다. Rosenblatt 변환은 설계점에서 비정규분포의 확률밀도함수와 분포함수의 값이 정규분포의 값과 동일하다는 개념에서 제안된 것이다. 만약 임의의 확률변수, X_i 가 분포함수, F_{X_i} 를 따른다고 가정하면 다음 식 (3)으로 정의될 수 있다[6].

$$F_{X_i}(x_i^d) = \Phi\left(\frac{x_i^d - \mu_{X_i'}}{\sigma_{X_i'}}\right) \quad (3a)$$

$$f_{X_i}(x_i^d) = \frac{1}{\sigma_{X_i'}} \phi\left(\frac{x_i^d - \mu_{X_i'}}{\sigma_{X_i'}}\right) \quad (3b)$$

여기서 $\mu_{X_i'}$ 와 $\sigma_{X_i'}$ 는 유사정규분포의 평균과 표준편차로 계산과정에 설계점의 자료를 이용하여 반복 계산되어야 하는 미지수가 된다. 설계점의 자료를 이용하면 유사정규분포의 평균과 표준편차는 식 (3)을 이용하면 다음 식 (4)로부터 쉽게 구할 수 있다.

$$\sigma_{X_i'} = \frac{\Phi[\Phi^{-1}\{F_{X_i}(x_i^d)\}]}{f_{X_i}(x_i^d)} \quad (4a)$$

$$\mu_{X_i'} = x_i^d - \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^d)]\sigma_{X_i'} \quad (4b)$$

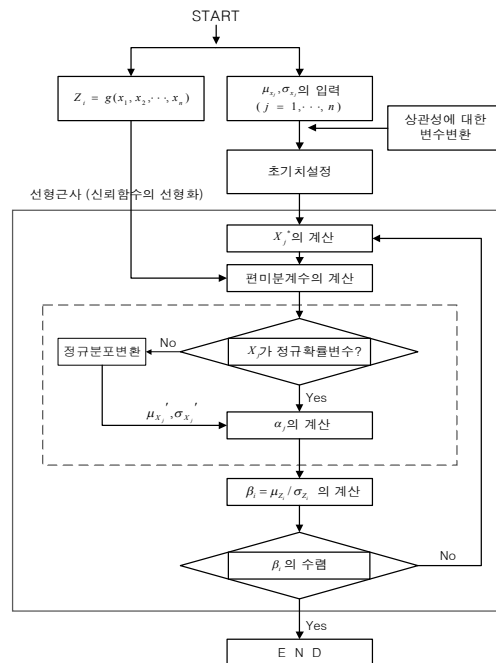


그림 2 AFDA 위험도 해석법의 흐름도

그러므로 파괴함수를 구성하는 확률분포가 정규 분포를 따르지 않는 경우라도 식 (3)과 식 (4)의 개념을 적용하여 변환하게 되면 모든 확률변수가 정규분포를 따르게 되고 신뢰지수와 파괴확률을 쉽게 구할 수 있다. AFDA에 의한 위험도 해석 흐름도를 그림 2에 제시하였다.

4. 월류 위험도 분석결과

우리나라의 제방고는 여유고 개념이 수리·수문 학적인 분석과 연관된 불확실성의 평가에 대한 설계 매개변수로서 사용되었다. 만약 이러한 불확실 성이 정량화 된다면, 여유고 요구조건이 없어도 제 방고 산정이 가능할 것이고, 이러한 불확실성을 평 가함으로써 제방고의 신뢰도 기준을 제시할 수 있 겠다. 위험도 분석에 사용된 입력 자료를 표 1에 제시하였다.

표 1 위험도 분석 입력자료

#	X_i	μ_{X_i}	COV_{X_i}	Distribution
1	H_L (m)	Various	0.08	Normal
2	d_w (m)	Various	0.20	Gumbel
3	Fd_w (m)	0.00	0.30	Normal

대상지역은 2차원 수치모형의 연구지점과 동일 하다. 월송천(No.0~No. 10) 지점에 대하여 1차원 모형인 HEC-RAS[7]와 2차원모형인 FESWMS-2 DH[8]의 홍수위 값을 가지고 좌·우안제방에 신뢰 지수와 파괴확률을 각각 분석 하였다. 표 2~5는 신뢰성 해석 값을 나타내었다.

표 2에서 가장 높은 파괴확률을 나타내는 지점 은 No. 5+29 이다. 좌안보다 우안의 파괴확률이 5.019 (%) 높게 나타났다. 또 상류에는 거의 파괴 확률이 나타나지 않았다. 이 경향은 HEC-RAS 해 석의 경향과 일치한다. 표 3에서 파괴확률이 5 (%)미만으로 작게 나타났다. 표 3 또한 상류보다 하류 지점이 파괴확률이 높았다. 파괴확률이 가장 높은 지점은 No. 5+29로 파괴확률이 4.449 (%) 나 타났다. FESWMS-2DH 해석의 경향과 일치 한다. 표 4는 HEC-RAS의 200년 빈도의 신뢰지수와 파 괴확률로 그 경향은 표 2의 80년 빈도의 해석 값 과 일치한다. 가장 파괴 확률이 높은 지점 No. 5+29의 우안의 파괴확률은 22.608 (%)로 해석 되 었다. 표 5는 FESWMS-2DH의 200년 빈도의 신 뢰지수와 파괴확률로 그 경향은 표 3의 80년 빈도 의 해석 값과 일치한다. 가장 파괴 확률이 높은 지 점 No. 5+29의 우안의 파괴 확률은 4.738 (%)로 해석되었다.

표 2 HEC-RAS 80년 빈도

HEC-RAS (좌안)							
측점	X_i	μ_{X_i}	σ_{X_i}	κ	λ	β	P_f (%)
No.0	H_L (m)	7.550	0.604	-	-	2.005	2.249
	d_w (m)	4.880	0.976	1.314	4.441		
No.1	H_L (m)	7.300	0.584	-	-	2.428	0.759
	d_w (m)	4.210	0.842	1.523	3.831		
No.2	H_L (m)	6.900	0.552	-	-	2.407	0.805
	d_w (m)	4.000	0.800	1.603	3.640		
No.3	H_L (m)	4.900	0.392	-	-	2.701	0.346
	d_w (m)	2.600	0.520	2.466	2.366		
No.4	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.814	0.245
	d_w (m)	2.040	0.408	3.144	1.856		
No.5	H_L (m)	3.900	0.312	-	-	2.292	1.096
	d_w (m)	2.300	0.460	2.788	2.093		
No. 5+29	H_L (m)	4.600	0.368	-	-	1.400	8.078
	d_w (m)	3.450	0.690	1.859	3.140		
No.6	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.662	0.389
	d_w (m)	2.130	0.426	3.011	1.938		
No.7	H_L (m)	4.800	0.384	-	-	4.035	0.003
	d_w (m)	1.740	0.348	3.685	1.583		
No.8	H_L (m)	5.100	0.408	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.410	0.282	4.548	1.283		
No.9	H_L (m)	4.900	0.392	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.380	0.276	4.647	1.256		
No.10	H_L (m)	5.000	0.400	-	-	4.461	0.000
	d_w (m)	1.610	0.322	3.983	1.465		

표 2 HEC-RAS 80년 빈도(계속)

HEC-RAS (우안)							
측점	X_i	μ_X	σ_X	κ	λ	β	P_f (%)
No.0	H_L (m)	7.800	0.624	-	-	2.129	1.663
	d_w (m)	4.880	0.976	1.314	4.441		
No.1	H_L (m)	7.300	0.584	-	-	2.428	0.759
	d_w (m)	4.210	0.842	1.523	3.831		
No.2	H_L (m)	6.900	0.552	-	-	2.407	0.805
	d_w (m)	4.000	0.800	1.603	3.640		
No.3	H_L (m)	5.400	0.432	-	-	3.056	0.112
	d_w (m)	2.600	0.520	2.466	2.366		
No.4	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	3.079	0.104
	d_w (m)	2.040	0.408	3.144	1.856		
No.5	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.387	0.850
	d_w (m)	2.300	0.460	2.788	2.093		
No.5+29	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	1.122	13.097
	d_w (m)	3.450	0.690	1.859	3.140		
No.6	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	2.928	0.171
	d_w (m)	2.130	0.426	3.011	1.938		
No.7	H_L (m)	5.000	0.400	-	-	4.186	0.001
	d_w (m)	1.740	0.348	3.685	1.583		
No.8	H_L (m)	5.210	0.417	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.410	0.282	4.548	1.283		
No.9	H_L (m)	5.110	0.409	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.380	0.276	4.647	1.256		
No.10	H_L (m)	5.100	0.408	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.610	0.322	3.983	1.465		

표 3 FESWMS-2DH 80년 빈도

FESWMS-2DH (좌안)							
측점	X_i	μ_X	σ_X	κ	λ	β	P_f (%)
No.0	H_L (m)	7.550	0.604	-	-	2.005	2.249
	d_w (m)	4.880	0.976	1.314	4.441		
No.1	H_L (m)	7.300	0.584	-	-	2.424	0.768
	d_w (m)	4.215	0.843	1.521	3.836		
No.2	H_L (m)	6.900	0.552	-	-	2.327	0.999
	d_w (m)	4.088	0.818	1.569	3.720		
No.3	H_L (m)	4.900	0.392	-	-	2.561	0.522
	d_w (m)	2.703	0.541	2.372	2.460		
No.4	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.942	0.163
	d_w (m)	1.966	0.393	3.262	1.789		
No.5	H_L (m)	3.900	0.312	-	-	2.998	0.136
	d_w (m)	1.884	0.377	3.404	1.714		
No.5+29	H_L (m)	4.600	0.368	-	-	2.629	0.428
	d_w (m)	2.486	0.497	2.580	2.262		
No.6	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.532	0.567
	d_w (m)	2.209	0.442	2.903	2.010		
No.7	H_L (m)	4.800	0.384	-	-	3.768	0.008
	d_w (m)	1.910	0.382	3.357	1.738		
No.8	H_L (m)	5.100	0.408	-	-	3.931	0.004
	d_w (m)	1.910	0.382	3.357	1.738		
No.9	H_L (m)	4.900	0.392	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.170	0.234	5.481	1.065		
No.10	H_L (m)	5.000	0.400	-	-	4.009	0.003
	d_w (m)	1.830	0.366	3.504	1.665		

표 3 FESWMS-2DH 80년 빈도(계속)

FESWMS-2DH (우안)							
측점	X_i	μ_X	σ_X	κ	λ	β	P_f (%)
No.0	H_L (m)	7.800	0.624	-	-	2.129	1.663
	d_w (m)	4.880	0.976	1.314	4.441		
No.1	H_L (m)	7.300	0.584	-	-	2.459	0.697
	d_w (m)	4.175	0.835	1.536	3.799		
No.2	H_L (m)	6.900	0.552	-	-	2.211	1.352
	d_w (m)	4.218	0.844	1.520	3.838		
No.3	H_L (m)	5.400	0.432	-	-	2.740	0.307
	d_w (m)	2.842	0.568	2.256	2.586		
No.4	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	3.079	0.104
	d_w (m)	2.040	0.408	3.144	1.856		
No.5	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.564	0.518
	d_w (m)	2.189	0.438	2.930	1.992		
No.5+29	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	1.701	4.449
	d_w (m)	2.982	0.596	2.150	2.714		
No.6	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	2.821	0.240
	d_w (m)	2.195	0.439	2.922	1.998		
No.7	H_L (m)	5.000	0.400	-	-	3.477	0.025
	d_w (m)	2.130	0.426	3.011	1.938		
No.8	H_L (m)	5.210	0.417	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	0.890	0.178	7.205	0.810		
No.9	H_L (m)	5.110	0.409	-	-	4.391	0.001
	d_w (m)	1.680	0.336	3.817	1.529		
No.10	H_L (m)	5.100	0.408	-	-	3.769	0.008
	d_w (m)	2.000	0.400	3.206	1.820		

표 4 HEC-RAS 200년 빈도

HEC-RAS (좌안)							
측점	X_i	μ_X	σ_X	κ	λ	β	P_f (%)
No.0	H_L (m)	7.550	0.604	-	-	1.562	5.916
	d_w (m)	5.470	1.094	1.172	4.978		
No.1	H_L (m)	7.300	0.584	-	-	1.931	2.675
	d_w (m)	4.810	0.962	1.333	4.377		
No.2	H_L (m)	6.900	0.552	-	-	1.909	2.814
	d_w (m)	4.570	0.914	1.403	4.159		
No.3	H_L (m)	4.900	0.392	-	-	1.942	2.608
	d_w (m)	3.200	0.640	2.004	2.912		
No.4	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.143	1.606
	d_w (m)	2.460	0.492	2.607	2.239		
No.5	H_L (m)	3.900	0.312	-	-	2.092	1.823
	d_w (m)	2.430	0.486	2.639	2.211		
No.5+29	H_L (m)	4.600	0.368	-	-	1.049	14.713
	d_w (m)	3.760	0.752	1.706	3.422		
No.6	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.158	1.547
	d_w (m)	2.450	0.490	2.617	2.230		
No.7	H_L (m)	4.800	0.384	-	-	3.514	0.022
	d_w (m)	2.020	0.404	3.175	1.838		
No.8	H_L (m)	5.100	0.408	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.550	0.310	4.137	1.411		
No.9	H_L (m)	4.900	0.392	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.520	0.304	4.219	1.383		
No.10	H_L (m)	5.000	0.400	-	-	4.165	0.002
	d_w (m)	1.750	0.350	3.664	1.593		

표 4 HEC-RAS 200년 빈도(계속)

HEC-RAS (우안)							
측점	X_i	μ_X	σ_X	κ	λ	β	P_f (%)
No.0	H_L (m)	7.800	0.624	-	-	1.697	4.486
	d_w (m)	5.470	1.094	1.172	4.978		
No.1	H_L (m)	7.300	0.584	-	-	1.931	2.675
	d_w (m)	4.810	0.962	1.333	4.377		
No.2	H_L (m)	6.900	0.552	-	-	1.909	2.814
	d_w (m)	4.570	0.914	1.403	4.159		
No.3	H_L (m)	5.400	0.432	-	-	2.332	0.985
	d_w (m)	3.200	0.640	2.004	2.912		
No.4	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	2.432	0.751
	d_w (m)	2.460	0.492	2.607	2.239		
No.5	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.194	1.412
	d_w (m)	2.430	0.486	2.639	2.211		
No.5+29	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	0.752	22.608
	d_w (m)	3.760	0.752	1.706	3.422		
No.6	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	2.446	0.723
	d_w (m)	2.450	0.490	2.617	2.230		
No.7	H_L (m)	5.000	0.400	-	-	3.678	0.012
	d_w (m)	2.020	0.404	3.175	1.838		
No.8	H_L (m)	5.210	0.417	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.550	0.310	4.137	1.411		
No.9	H_L (m)	5.110	0.409	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.520	0.304	4.219	1.383		
No.10	H_L (m)	5.100	0.408	-	-	4.248	0.001
	d_w (m)	1.750	0.350	3.664	1.593		

표 5 FESWMS-2DH 200년 빈도

FESWMS-2DH (좌안)							
측점	X_i	μ_X	σ_X	κ	λ	β	P_f (%)
No.0	H_L (m)	7.550	0.604	-	-	1.556	5.987
	d_w (m)	5.470	1.094	1.172	4.978		
No.1	H_L (m)	7.300	0.584	-	-	1.950	2.560
	d_w (m)	4.787	0.957	1.340	4.356		
No.2	H_L (m)	6.900	0.552	-	-	1.833	3.341
	d_w (m)	4.661	0.932	1.376	4.242		
No.3	H_L (m)	4.900	0.392	-	-	1.863	3.124
	d_w (m)	3.249	0.650	1.974	2.957		
No.4	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.175	1.482
	d_w (m)	2.427	0.485	2.642	2.209		
No.5	H_L (m)	3.900	0.312	-	-	2.476	0.665
	d_w (m)	2.181	0.436	2.940	1.985		
No.5+29	H_L (m)	4.600	0.368	-	-	2.247	1.233
	d_w (m)	2.774	0.555	2.312	2.524		
No.6	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.666	0.384
	d_w (m)	2.114	0.423	3.033	1.924		
No.7	H_L (m)	4.800	0.384	-	-	3.465	0.027
	d_w (m)	2.039	0.408	3.145	1.856		
No.8	H_L (m)	5.100	0.408	-	-	3.657	0.013
	d_w (m)	2.060	0.412	3.113	1.875		
No.9	H_L (m)	4.900	0.392	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.223	0.245	5.243	1.113		
No.10	H_L (m)	5.000	0.400	-	-	3.580	0.017
	d_w (m)	2.064	0.413	3.107	1.878		

표 5 FESWMS-2DH 200년 빈도(계속)

FESWMS-2DH (우안)							
측점	X_i	μ_{X_i}	σ_{X_i}	κ	λ	β	P_f (%)
No.0	H_L (m)	7.800	0.624	-	-	1.692	4.534
	d_w (m)	5.470	1.094	1.172	4.978		
No.1	H_L (m)	7.300	0.584	-	-	1.959	2.506
	d_w (m)	4.775	0.955	1.343	4.345		
No.2	H_L (m)	6.900	0.552	-	-	2.139	1.622
	d_w (m)	4.300	0.860	1.491	3.913		
No.3	H_L (m)	5.400	0.432	-	-	2.345	0.952
	d_w (m)	3.170	0.634	2.023	2.885		
No.4	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	2.656	0.396
	d_w (m)	2.300	0.460	2.788	2.093		
No.5	H_L (m)	4.000	0.320	-	-	2.319	1.020
	d_w (m)	2.344	0.469	2.736	2.133		
No. 5+29	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	1.671	4.738
	d_w (m)	3.005	0.601	2.134	2.735		
No.6	H_L (m)	4.300	0.344	-	-	2.555	0.531
	d_w (m)	2.366	0.473	2.710	2.153		
No.7	H_L (m)	5.000	0.400	-	-	3.263	0.055
	d_w (m)	2.264	0.453	2.832	2.060		
No.8	H_L (m)	5.210	0.417	-	-	5.001	0.000
	d_w (m)	1.001	0.200	6.406	0.911		
No.9	H_L (m)	5.110	0.409	-	-	4.121	0.002
	d_w (m)	1.813	0.363	3.537	1.650		
No.10	H_L (m)	5.100	0.408	-	-	3.315	0.046
	d_w (m)	2.277	0.455	2.816	2.072		

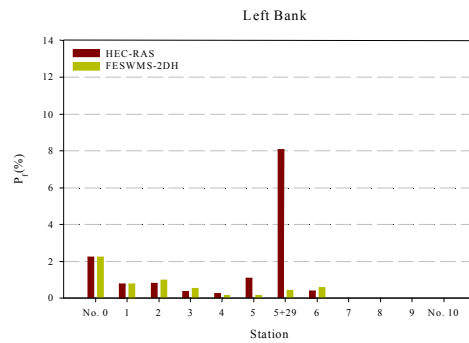
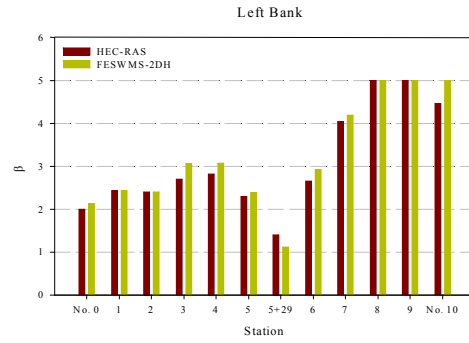


그림 3a 80년 빈도 신뢰지수와 파괴 확률

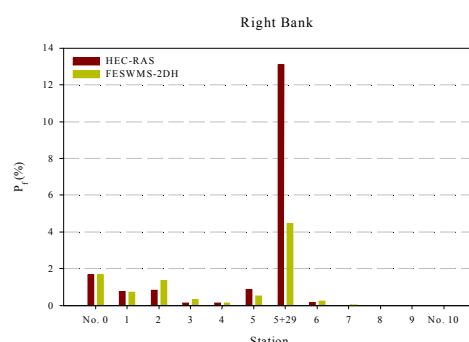
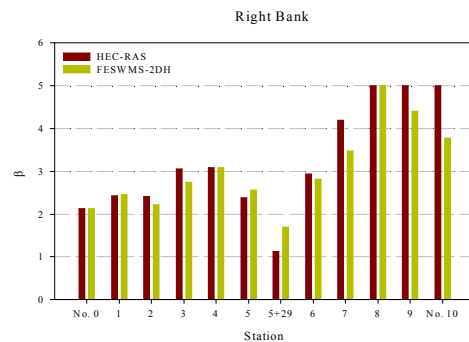


그림 3b 80년 빈도 신뢰지수와 파괴 확률

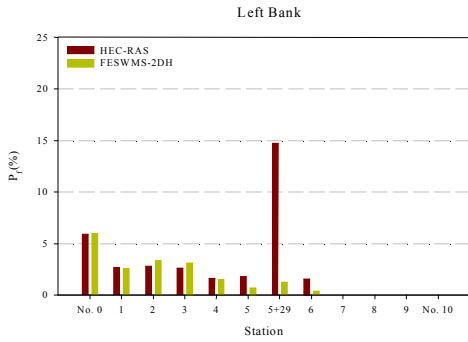
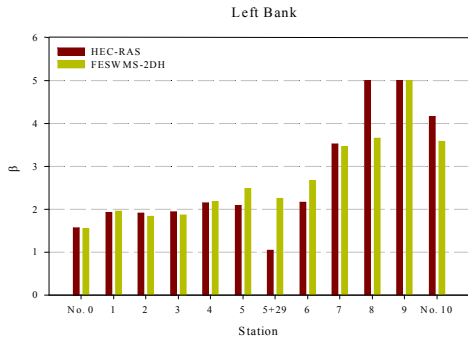


그림 4a 200년 빈도 신뢰지수와 파괴확률

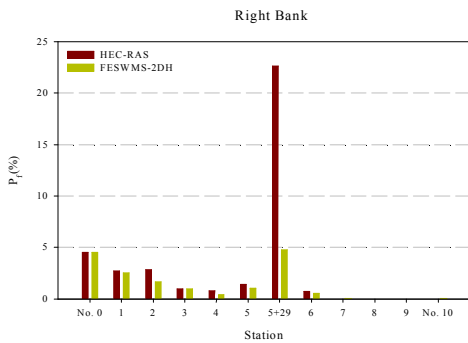
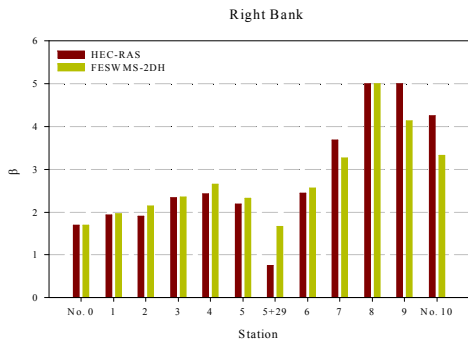


그림 4b 200년 빈도 신뢰지수와 파괴확률

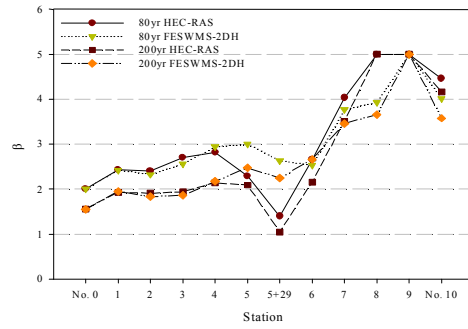


그림 5 좌안 신뢰지수

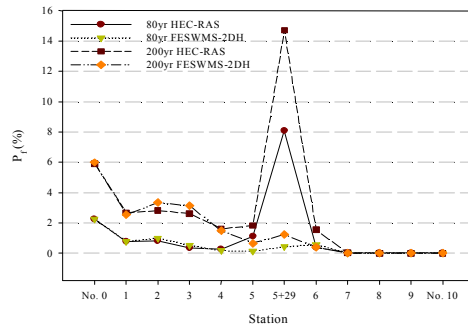


그림 6 좌안 파괴확률

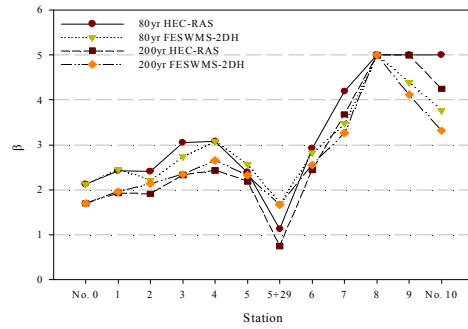


그림 7 우안 신뢰지수

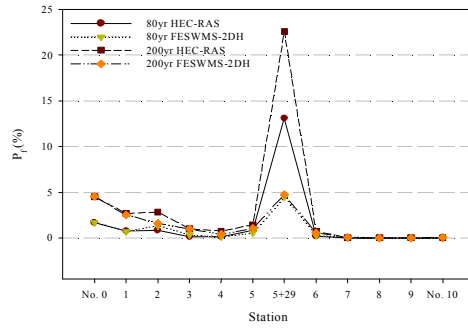


그림 8 우안 파괴확률

그림 3~8은 80년 빈도와 200년 빈도에 대하여 1차원 HEC-RAS 모형과 2차원 FESWMS-2DH 모형의 신뢰함수와 파괴확률을 나타내었다. 그림 3~4에서 파괴확률이 상류보다는 하류에 더 높게 나타났다. 이는 월송천과 북한강 합류부의 수위 상승의 영향이다. 또한 두 모형 모두 5+29년 단면의 우측제방에서 연구지점 중 가장 높은 월류 위험도를 나타내었다. 5+29단면에서 HEC-RAS모형이 FESWMS-2DH 모형보다 과대하게 산출되었다. 이는 교각 주변의 흐름특성이 합리적으로 반영되지 못하였기 때문이다. 그림 5~8은 좌·우안의 빈도별 신뢰지수와 파괴확률을 나타내었고, 80년 빈도보다 200년 빈도가 높게 나타났다. 80년 빈도와 200년 빈도를 비교 하였을 때 HEC-RAS 모형이 FESWMS-2DH 모형 보다 파괴확률 증가량이 큰 것을 확인할 수 있다. 80, 200년 빈도의 경향이 일치함으로 합리적으로 산정되었다고 할 수 있다.

하천제방의 안정성 분석을 위한 위험도 분석을 실시한 결과, 전체적으로 대부분 5 % 이하의 파괴확률을 보였다. 80년 빈도로 설계된 하천제방이 200년도 홍수량에 대해서도 매우 안전하게 분석되었다.

5. 결론

설계빈도의 무조건적인 상향조정에 따른 확정론적인 방법에 의존하기보다는 체계학적 방법을 도입한 수문량 확충, 매개변수에 포함된 불확실도 해석이 필요하게 되었다. 따라서 하천 제방의 설계와 평가과정에는 불확실성이 포함되기 때문에 이에 따른 위험도의 산정이 반드시 고려되어야 한다.

이와 같은 불확실성에 따른 제방의 위험도를 정량적으로 평가하기 위하여 본 연구에서는 신뢰성 해석 이론을 도입하였다.

먼저 홍수위와 설계 제방고를 이용하여 파괴함수를 수립하였다. 파괴함수의 모든 변수는 임의의 분포함수를 따르는 확률변수로 고려하였고, 홍수위가 제방의 설계고보다 높지 형성될 가능성을 위험도라 정의하였다. 위험도 평가모형은 AFDA (Approximate Full Distribution Approach) 해석법을 이용하여 개발되었다. 2차원 수치해석 모형 FESWMS-2DH에서 산정된 홍수위가 본 연구에서 개발된 제방 월류 위험도 평가모형의 입력 자료로 사용하였다. 하천제방 설계에 2차원 수치해석을 적용한 위험도 분석 방법을 통해 향후 하천기술자들이 이 자료를 적용하여 실무에 응용할 수 있도록 제방 월류 위험도분석에 대한 결과를 정량적으로 제시하였다. 따라서 본 연구는 하천제방설계 위험도 분석 연구를 수행한 것으로서 이들 과정을 체계적인 계산 과정에 의해 제방의 단면결정에 적용하면

불확실성에 따른 위험도를 평가할 수 있다. 먼저 홍수위와 설계 제방고를 이용하여 신뢰함수를 수립하였고 위험도 평가모형은 AFDA (Approximate Full Distribution Approach) 해석법을 이용하여 개발하였다.

하천제방 설계에 2차원 수치해석을 적용한 위험도 분석 방법을 통해 향후 하천기술자들이 이 자료를 적용하여 실무에 응용할 수 있도록 제방 월류 위험도분석에 대한 결과를 정량적으로 제시하였다.

본 연구는 하천제방 설계시 위험도 분석 연구를 수행한 것으로서 이들 과정을 체계적인 계산 과정에 의해 제방의 단면결정에 적용하면 불확실성에 따른 위험도를 평가할 수 있다.

본 연구는 월송천 하류부를 대상으로 연구를 수행하였으나 향후 각 치수유역별로 위험도 평가가 수행되어야 한다. 또한 경제성분석을 통한 합리적 제방설계에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] 이철웅, "신뢰성 설계법의 개요", 제1회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop 자료집, pp.3-24, 2007.
- [2] 박동현, "역해석법에 의한 피복재의 부분안전계수 산정", 강원대학교 석사논문, 2008.
- [3] 이철웅, "피복재의 부분안전계수 산정", 한국해안·해양공학회지, 제 19권, 제 4호, pp.336- 344, 2007.
- [4] 이철웅, "항만 구조물 부분안전계수의 산정 및 적용", 제1회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop 자료집, pp.101-120, 2007.
- [5] 이철웅, "피복재의 신뢰성 해석과 부분안전계수 산정", 제2회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop, pp.145-183, 2008.
- [6] Ang, Alfredo H-S., and Tang, Wilson H., "Probability Concepts In Engineering Planning And Design Volume II", pp.333-447, 1984.
- [7] User's Manual for HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, 2001.
- [8] User's Manual for FESWMS FST2DH, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2002.
- [9] 심재욱, "2차원 수치모형을 이용한 제방 월류 위험도 해석", 강원대학교 석사논문, 2008.